

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ АТМОСФЕРЫ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МКС ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ТОКСИЧНЫМ КОМПОНЕНТОМ

© 2018 г. Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Телегин А.А., Юргин А.В.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Исследована очистка атмосферы Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) вновь разработанными российскими агрегатом АФОТ-М и аммиачным фильтром ФТД-А в случае разгерметизации наружного теплообменника, соединяющего наружный и внутренний контуры системы обеспечения теплового режима на Американском сегменте (АС) МКС. Поскольку давление в наружном контуре значительно больше, чем во внутреннем, в результате попадания аммиака во внутренний контур системы обеспечения теплового режима происходит разгерметизация контура с попаданием аммиака в атмосферу АС МКС и далее — в атмосферу РС МКС.

Получены экспериментальные данные по поглощению аммиака разработанным отечественным аммиачным фильтром ФТД-А. Разработана методика расчета очистки атмосферы РС МКС от аммиака и проведена обработка экспериментальных данных, рассчитана длительность очистки атмосферы корабля «Союз» и модулей РС МКС, подтверждена эффективность очистки. Рекомендован метод параллельной работы фильтров для очистки атмосферы модулей с целью эффективного использования поглотителей.

Ключевые слова: космическая станция, МКС, Российский сегмент, Американский сегмент, аммиак, аммиачный фильтр, разгерметизация, система обеспечения теплового режима, очистка атмосферы, методика расчета, обработка экспериментальных данных, параллельная работа фильтров.

A STUDY OF PURIFICATION OF THE ISS RUSSIAN SEGMENT ATMOSPHERE IN CASE OF A CONTAINMENT FAILURE IN THE HARDWARE CONTAINING A TOXIC COMPONENT

Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A., Yurgin A.V.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

A study has been conducted on purification of the atmosphere in the Russian Segment of the International Space Station (ISS) using the newly developed Russian AFOT-M assembly and FTD-A ammonia filter in case of a containment failure in the external heat exchanger connecting the inner and outer loops of the Thermal Control System (TCS) on the US Orbital Segment of the ISS. Since the pressure in the outer loop is significantly higher than in the inner loop, an entry of ammonia into the inner TCS loop will result in the loop containment failure with ammonia entering the US Orbital Segment atmosphere and, subsequently, into the ISS Russian Segment atmosphere.

Experimental data was obtained on ammonia absorption by the Russian-made ammonia filter FTD-A. A procedure was developed for calculating the removal of ammonia from the ISS Russian Segment atmosphere and experimental data was processed resulting in time values for Soyuz and ISS Russian Segment atmosphere purification that confirmed the effectiveness of the scrubbing. A parallel filter operation method is recommended for scrubbing the module atmosphere in order to achieve efficient use of the absorbers.

Key words: Space Station, ISS, Russian Segment, US Orbital Segment, ammonia, ammonia filter, containment failure, Thermal Control System, air purification, calculation procedure, experimental data processing, parallel filter operation.



ГУЗЕНБЕРГ А.С.



ЖЕЛЕЗНЯКОВ А.Г.



ТЕЛЕГИН А.А.



ЮРГИН А.В.

ГУЗЕНБЕРГ Аркадий Самуилович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
GUZENBERG Arkadiy Samuilovich — Candidate of Science (Engineering), Senior research scientist at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Григорьевич — руководитель НТЦ РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
ZHELEZNYAKOV Alexander Grigoryevich — Head of STC at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

ТЕЛЕГИН Александр Анатольевич — ведущий специалист РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
TELEGIN Alexander Anatolyevich — Lead specialist at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

ЮРГИН Алексей Викторович — ведущий инженер-математик РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
YURGIN Aleksey Viktorovich — Lead engineer-mathematician at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

Введение

Источниками выделения вредных примесей в атмосферу обитаемых модулей космических станций являются неметаллические материалы оборудования и конструкции; потеря герметичности служебных систем, содержащих токсичные материалы (газы, жидкости, гранулы твердых материалов); человек [1]. Особую опасность представляют выбросы токсичных газов, концентрация которых в атмосфере в этом случае может значительно превышать предельно допустимые концентрации и представлять угрозу для здоровья и жизни экипажа [2].

Одной из возможных опасностей является наличие аммиака в американской системе обеспечения теплового режима (СОТР) на Международной космической станции (МКС) [3].

Два внешних контура американской СОТР на лабораторном модуле Американского сегмента (АС) МКС содержат 295 кг жидкого аммиака, рабочее давление в них составляет 19,0...24,5 атм, а два внутренних контура содержат 132,5 л воды, рабочее давление в них составляет 3,0...7,0 атм. Внешний и внутренний контуры соединены между собой теплообменником, состоящим из спаянных листов нержавеющей стали толщиной 0,25 мм.

В случае разгерметизации теплообменника между внешним и внутренним контурами при замерзании водяных магистралей (при отказе защиты теплообменника) при давлении выше 15,0 атм разгерметизируется газоотделитель блока гидронасосов внутреннего контура, что приводит к утечке в атмосферу АС МКС смеси воды с аммиаком. Максимальное содержание

аммиака в атмосфере АС МКС для предполагаемых величин образующихся отверстий, по данным NASA, может достигнуть $28\,000\text{ мг/м}^3$, тогда как содержание аммиака $350\text{--}700\text{ мг/м}^3$ опасно для жизни (безопасным считается содержание аммиака менее 20 мг/м^3 (30 ppm). При достаточно быстром переходе в служебный модуль (СМ) Российского сегмента (РС) МКС ($\sim 10\text{--}15$ мин) американский экипаж может быть спасен [4, 5].

По контракту с NASA РКК «Энергия» разработала для очистки от аммиака, попадающего в атмосферу РС МКС в этой ситуации, комплект агрегатов, состоящий из микрокомпрессора АФОТ-М и аммиачного фильтра ФТД-А, который должен отвечать следующим требованиям:

- концентрация аммиака в атмосфере космического аппарата (КА) «Союз» объемом $10,3\text{ м}^3$ должна снижаться с концентрации $10\,000\text{ ppm}$ ($7\,000\text{ мг/м}^3$) до $1\,200\text{ ppm}$ (780 мг/м^3) в течение 20 мин с продолжением снижения до 100 ppm (70 мг/м^3) в течение 8 ч и с продолжением поглощения аммиака до концентрации менее 20 ppm (14 мг/м^3) в течение 24 ч;

- продолжительность очистки атмосферы совместного объема КА «Союз» ($10,3\text{ м}^3$) и МИМ1 ($16,0\text{ м}^3$) должна быть определена при снижении концентрации аммиака с $10\,000$ до 20 ppm , при этом должны быть определены необходимое количество фильтров для этой очистки и концентрация, достигаемая работой одного фильтра;

- по данным испытаний должны быть определены необходимое время и количество фильтров, необходимых для снижения концентрации аммиака в атмосфере РС МКС (СМ, ФГБ, МИМ1, МИМ2 и МЛМ) с $10\,000$ до 30 ppm ; анализ должен включать скорость снижения и конкретное время достижения $5\,000$; $1\,000$; 300 ; 100 и 30 ppm .

Методика расчета изменения содержания аммиака

Полученное нами аналитическое решение дифференциального уравнения для изменения концентрации газовой примеси при очистке атмосферы гермообъема [6] было применено для разработки методики по противодействию последствиям разгерметизации теплообменника между аммиачным (внешним) и водяным (внутренним)

контурами системы обеспечения теплового режима Американского сегмента Международной космической станции.

Выброс аммиака разовый, т. е. при очистке атмосферы концентрация аммиака стремится к нулю. Методика расчета была разработана на основе экспериментов по определению сорбционных характеристик фильтра и полученной нами формулы для разового выброса газовой примеси [6]:

$$C = C_0 e^{-(K_{\text{эф}} G t / V)}, \quad (1)$$

где C и C_0 — конечная и начальная концентрации аммиака в атмосфере гермомодуля; t — время очистки; V — объем очищаемого гермомодуля; $K_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективности расхода очистки; $K_{\text{эф}} = 1$ при работе фильтра без проскока (концентрации примесей в воздухе на выходе из фильтра); $G = 70,5\text{ м}^3/\text{ч}$ — объемный расход воздуха через аммиачный фильтр.

$$K_{\text{п}} = C_{\text{вых}} / C_{\text{вх}},$$

где $K_{\text{п}}$ — коэффициент проскока газовой примеси через фильтр; $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вых}}$ — текущие концентрации аммиака: $C_{\text{вх}}$ — на входе в систему очистки; $C_{\text{вых}}$ — на выходе из нее.

$$K_{\text{эф}} = (1 - K_{\text{п}}).$$

Проведенная обработка экспериментальных данных (табл. 1–3) по сорбции аммиака фильтром (а также по сорбции аммиака модельными трубками) показала, что фильтр при заданных характеристиках поглощает аммиак без проскока из атмосферы КА «Союз» (объем $10,3\text{ м}^3$). Для подтверждения этого положения на рис. 1 представлена расчетная кривая работы фильтра без проскока, по результатам экспериментальных данных по фильтрам ФТД-А нанесены точки времени начала проскока (входные концентрации $11\,086$; $10\,286$ и $3\,286\text{ ppm}$) и проведена экспериментальная кривая. Поскольку расчетная кривая проходит левее экспериментальной, представленные графики свидетельствуют о том, что полноразмерный фильтр при очистке атмосферы КА «Союз» работает без проскока.

При очистке больших объемов, чем объем КА «Союз», фильтр при использовании его динамической емкости работает с проскоком. Для этого в формуле (1) имеется коэффициент эффективности работы фильтра $K_{\text{эф}}$.

Таблица 1

Результаты испытаний фильтра при средней начальной концентрации аммиака $C = 7\ 200\ \text{мг/м}^3$ (10 286 ppm)

Начальная концентрация аммиака $C_{\text{нач}}, \text{мг/м}^3$	Концентрация аммиака за фильтром $C_{\text{проск}}, \text{мг/м}^3$	Время достижения концентрации аммиака $C_{\text{проск}}, \text{мин}$
7 000	20	21
8 000	5 300	24
7 200	7 000	33
7 200	7 200	37

Таблица 2

Результаты испытаний фильтра при средней начальной концентрации аммиака $C = 2\ 180\ \text{мг/м}^3$ (3 114 ppm)

Начальная концентрация аммиака $C_{\text{нач}}, \text{мг/м}^3$	Концентрация аммиака за фильтром $C_{\text{проск}}, \text{мг/м}^3$	Время достижения концентрации аммиака $C_{\text{проск}}, \text{мин}$
2 170	20	49
2 190	2 100	54
2 300	2 300	65

Таблица 3

Экспериментальные данные по концентрациям аммиака при проскоке

$C_{\text{вх}}, \text{мг/м}^3$ (ppm)	Длительность проскока $t_{\text{проск}}, \text{мин}$	Процент поглощения аммиака на проскоке (100% – без проскока)	Оборудование для поглощения аммиака
7 200 (10 286)	16	21	Фильтры ФТД-А
3 286 (4 694)	16	15,8	
1 050 (1 500)	130	28,9	Трубки с поглотителем
100 (143)	2 320	–	

Поскольку величина эффективности, отражающая проскок, является переменной, ее экспериментальные значения для расчета описываются зависимостями, приведенными на рис. 2. При начале расчета используется $K_{\text{эф}} = 1$ (работа без

проскока на новом фильтре после замены). Так как при очистке атмосферы модуля МИМ1, суммарного объема модуля МИМ1 вместе с КА «Союз» и объема РС МКС фильтры работают с проскоком, то на каждом шаге вычислений для последующей концентрации рассчитывается сумма поглощенного аммиака с начала работы фильтра ФТД-А.

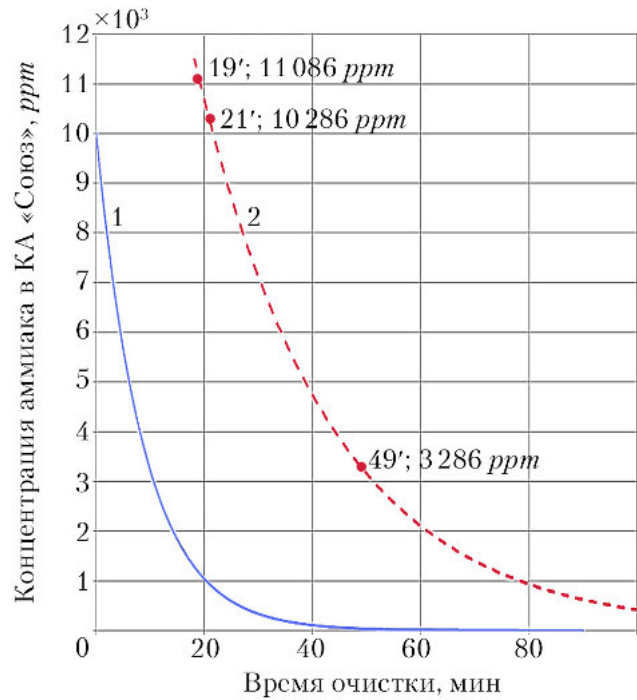


Рис. 1. Время начала проскока в зависимости от входной концентрации аммиака: 1 – расчетное снижение концентрации аммиака в атмосфере корабля «Союз» при работе АФОТ без проскока с расходом $70,5\ \text{м}^3/\text{ч}$; 2 – время начала проскока в зависимости от входной концентрации аммиака

При достижении емкости фильтра, соответствующей началу проскока ($C_{\text{вых}} = 30\ \text{ppm}$) по кривым 1, 2 на рис. 2, расчет продолжается с учетом проскока.

Количество аммиака, поглощенного при проскоке, определялось по формуле:

$$Q_{\text{проск}} = C_{\text{нач}} t_{\text{проск}} G K_{\text{эфп}}$$

где $Q_{\text{проск}}$ – количество поглощенного аммиака при проскоке; $K_{\text{эфп}}$ – коэффициент суммарного поглощения при проскоке (для расчета принят $K_{\text{эфп}} = 0,2$ для всего диапазона концентраций); $t_{\text{проск}}$ – длительность проскока (для расчета приняты $t_{\text{проск}} = 16\ \text{мин}$ для концентраций $10\ 000...3\ 000\ \text{ppm}$ по кривой 1 рис. 2, по кривой 2 рис. 2 – для концентраций $3\ 000...300\ \text{ppm}$ $t_{\text{проск}} = 400\ 109C^{-1,157}$, где C – средняя концентрация в очищаемом модуле при проскоке); $C_{\text{нач}}$ – начальная концентрация в модуле при начальном проскоке на фильтре ($C_{\text{вых}} = 30\ \text{ppm}$).

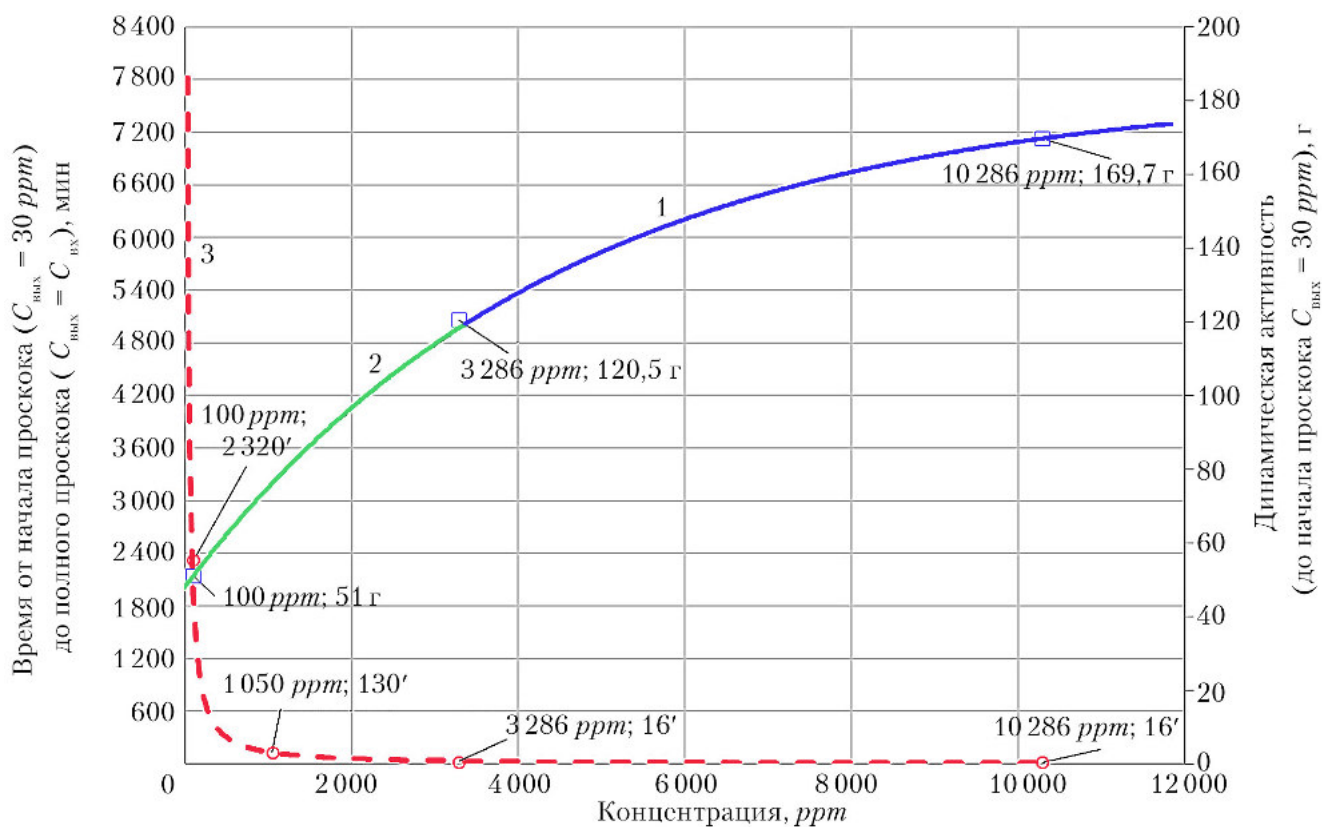


Рис. 2. Зависимость динамической активности (1, 2) и длительности проскоковой концентрации (3) для поглотителя ФТД-А от концентрации аммиака

Конечная концентрация в очищаемом модуле после полного проскока составит:

$$C_{\text{кон}} = (C_{\text{нач}} V - Q_{\text{проск}}) / V.$$

Как видно из графиков рис. 2, при уменьшении концентрации аммиака в атмосфере емкость поглотителя уменьшается, а время очистки при проскоке увеличивается.

Результаты расчета изменения концентрации аммиака

Характеристики поглощения аммиака при очистке атмосферы РС МКС, полученные в результате расчетов, проведенных по разработанной методике, представлены на рис. 3–5. На рис. 3 представлены графики очистки атмосферы КА «Союз» и модуля МИМ1. На графики нанесены также времена достижения промежуточных концентраций 5 000; 1 000; 300, 100 и 30 pppt.

Количество аммиака в атмосфере КА «Союз» при 10 000 pppt составляет 72,1 г. Очистка атмосферы КА «Союз» с 10 000 до 20 pppt происходит за 55 мин одним фильтром без проскока.

Количество аммиака в атмосфере КА «Союз» совместно с МИМ1 (свободный объем которого 16,0 м³) составляет 185,0 г.

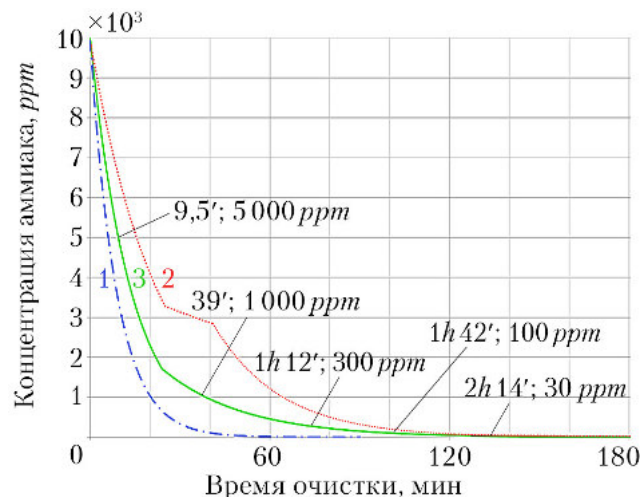


Рис. 3. Очистка атмосферы: 1 – КА «Союз» без проскока одним фильтром (объем 10,3 м³); 2 – «Союз» + МИМ1 с проскоком двумя фильтрами (объем 26,3 м³); 3 – МИМ1 с проскоком одним фильтром (объем 16 м³)

Расчет с учетом полного проскока показал, что для очистки этого количества с 10 000 до 20 pppt требуется два ФТД-А, и время очистки увеличивается до 3 ч.

Для очистки атмосферы Российского сегмента расчет был проведен для конфигурации РС МКС на 2017 г. без модуля МЛМ (рис. 4), а также – с модулем МЛМ (рис. 5), который, в соответствии с программой полета МКС, должен быть запущен в 2019 г.

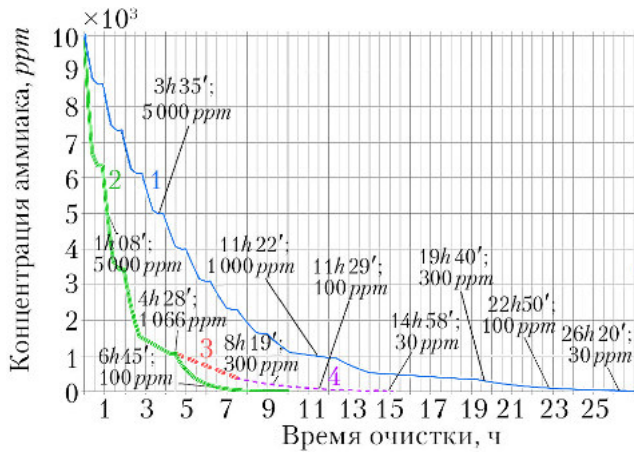


Рис. 4. Очистка атмосферы РС МКС объемом 203,4 м³ (СМ + СО1 + МИМ2 + МИМ1 + ФГБ + два корабля «Прогресс» без МЛМ и двух КА «Союз»): 1 – работает один АФОТ-М; 2 – работают параллельно три АФОТ-М; 3 – работают параллельно три АФОТ-М с тремя отработавшими фильтрами КА «Союз»; 4 – работает один АФОТ-М

На рис. 4, кривая 1, и на рис. 5 показано, что каждый фильтр работал до полного проскока, при этом 15 мин было отведено на его замену (последовательная работа фильтров). Для очистки РС без МЛМ понадобилось 11 фильтров, для очистки РС с МЛМ – 13. Полное время очистки атмосферы РС МКС без МЛМ до 20 ppt составило 27 ч 25 мин, при этом 150 мин из них ушло на замену фильтров. Полное время очистки атмосферы РС МКС с МЛМ – 34 ч 07 мин до 20 ppt, из них 180 мин – на замену фильтров.

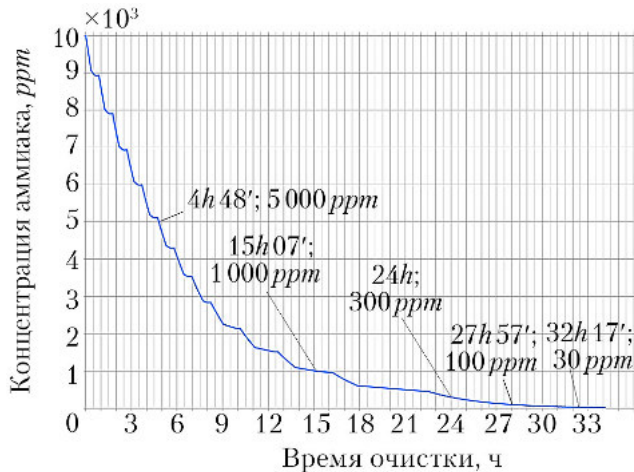


Рис. 5. Очистка атмосферы РС МКС объемом 252,8 м³ (МЛМ + СМ + МИМ2 + МИМ1 + ФГБ + два корабля «Прогресс» без СО1 и двух КА «Союз»)

На рис. 4, кривая 2, представлена очистка атмосферы объема РС без МЛМ тремя фильтрами одновременно (параллельная работа фильтров). Сравнение параллельной и последовательной очистки показывает, что при параллельной работе трех фильтров концентрация

аммиака 3 000 ppt достигается через 2 ч, тогда как при последовательной работе одним фильтром – более чем за 6 ч, при этом снижение до 20 ppt при трех фильтрах происходит всего за 8 ч 18 мин, но используется на один фильтр больше – 12 фильтров.

Однако, если использовать уже отработавшие три фильтра космического корабля «Союз», а затем один новый, то количество новых фильтров можно свести к 10, продолжительность работы до 20 ppt в этом случае составляет 16 ч 08 мин (рис. 4, продолжение кривой 2 пунктиром от 1 066 ppt – кривые 3 и 4).

Таким образом, для безопасности экипажа рекомендуется параллельная работа фильтров в каждом модуле станции отдельно, что позволяет при расходе воздуха 70,5 м³/ч для модулей размерности МИМ быстро снижать концентрацию аммиака до безопасного уровня.

Выводы

1. Рассмотрен вопрос разгерметизации аммиачного контура АС МКС с попаданием аммиака в атмосферу РС МКС и ее очистки до безопасных концентраций.

2. Разработана оригинальная методика расчета и проведена обработка экспериментальных данных по очистке атмосферы модулей РС МКС от аммиака российским аммиачным фильтром, показавшая быстрое уменьшение динамической емкости поглотителя при уменьшении концентрации аммиака и подтвердившая выполнение требований технического задания.

3. Обработка данных применительно к объединенному объему корабля «Союз» (10,3 м³) и МИМ1 (16,0 м³) с содержанием 185,0 г аммиака при 10 000 ppt при номинальном расходе воздуха через фильтр (70,5 м³/ч) показала возможность очистки этого объема двумя фильтрами ФТД-А с учетом проскока аммиака за слоем поглотителя. При этом время очистки от аммиака объединенного объема 26,3 м³ с 10 000 до 20 ppt составило 182 мин.

4. Для очистки РС МКС без МЛМ при последовательной работе фильтров необходимо дополнительно к фильтрам КА «Союз» еще 11 фильтров. При параллельной работе требуется дополнительно 12 фильтров или 10 (при использовании фильтров КА «Союз»), при этом обеспечиваются более быстрые снижение

концентраций и очистка. Время очистки при параллельной работе трех фильтров до 20 ppm составляет 8 ч 18 мин, при работе с использованием отработанных фильтров кораблей «Союз» — 16 ч 08 мин.

5. Рекомендовано использовать параллельную работу фильтров для увеличения их эффективности по очистке атмосферы от аммиака с целью обеспечения безопасности экипажа за счет быстрого снижения высокой концентрации аммиака.

Список литературы

1. Романов С.Ю., Мухамедиева Л.Н., Гузенберг А.С., Микос К.Н. Вредные примеси в атмосфере обитаемых космических станций // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 1. С. 31–49.

2. Юргин А.В., Романов С.Ю., Гузенберг А.С., Мухамедиева Л.Н. Обеспечение токсической безопасности атмосферы обитаемых космических станций при аварийных ситуациях // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 3. С. 75–81.

3. Романов С.Ю., Телегин А.А., Гузенберг А.С., Юргин А.В., Павлова А.Г. Космические системы обеспечения: особенности обеспечения токсической безопасности искусственной среды на многомодульных космических станциях // Инженерная экология. 2013. № 2(110). С. 50–62.

4. Macatangay A.V., Prokhorov K.S., Sweterlitsch J.J. Strategies to mitigate ammonia release on the International Space Station // NASA. SAE Technical paper series 2007-01-2806.

5. Duchesne S.M., Sweterlitsch J.J., Son Ch.X., Perry J.L. Brief information under the analysis of emission of ammonia in case of break interface heat exchanger ISS // CM 019 (Rev. 01/2011). NASA 01.2012. P. 40.

6. Романов С.Ю., Елчин А.П., Гузенберг А.С. Система вентиляции многомодульного обитаемого космического комплекса как связующая систем регенерационного комплекса жизнеобеспечения // Пилотируемые полеты в космос. 2017. № 3(24). С. 58–71.

Статья поступила в редакцию 25.04.2018 г.

Reference

1. Romanov S.Yu., Mukhamedieva L.N., Guzenberg A.S., Mikos K.N. Vrednyye primesi v atmosfere obitaemykh kosmicheskikh stantsiy [Harmful impurities in the atmosphere of inhabited space stations]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2006, no. 1, pp. 31–49.

2. Yurgin A.V., Romanov S.Yu., Guzenberg A.S., Mukhamedieva L.N. Obespechenie toksicheskoy bezopasnosti atmosfery obitaemykh kosmicheskikh stantsiy pri avariynykh situatsiyakh [Assuring toxic safety of the atmosphere of inhabited space stations in emergencies]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2007, no. 3, pp. 75–81.

3. Romanov S.Yu., Telegin A.A., Guzenberg A.S., Yurgin A.V., Pavlova A.G. Kosmicheskie sistemy obespecheniya: osobennosti obespecheniya toksicheskoy bezopasnosti iskusstvennoy sredy na mnogomodul'nykh kosmicheskikh stantsiyakh [Space support systems: features of assuring toxic safety of the artificial environment at multimodule space stations]. *Inzhenernaya ekologiya*, 2013, no. 2(110), pp. 50–62.

4. Macatangay A.V., Prokhorov K.S., Sweterlitsch J.J. Strategies to mitigate ammonia release on the International Space Station. NASA. SAE Technical paper series 2007-01-2806.

5. Duchesne S.M., Sweterlitsch J.J., Son Ch.X., Perry J.L. Brief information under the analysis of emission of ammonia in case of break interface heat exchanger ISS. CM 019 (Rev. 01/2011). NASA 01.2012. P. 40.

6. Romanov S.Yu., Elchin A.P., Guzenberg A.S. Sistema ventilyatsii mnogomodul'nogo obitaемого kosmicheskogo kompleksa kak svyazuyushchaya sistem regeneratsionnogo kompleksa zhizneobespecheniya [The ventilation system of a multimodule inhabited space complex as a binder of the regenerative life support systems]. *Pilotiruemye polety v kosmos*, 2017, no. 3(24), pp. 58–71.